ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΙΣΤΑΘΜΙΣΤΗ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ – STATCOM ΓΙΑ ΤΗ ΡΥΘΜΙΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΣΤΟ ΖΥΓΟ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ

Βασίλης Ν. Γιωτόπουλος, Μάριος Χ. Φούρναρης, Γεώργιος Ν. Κορρές

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Ζωγράφου
e-mail: gkorres@cs.ntua.gr

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η ποιότητα και η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) αποτελεί ένα σοβαρό ζήτημα ερευνητικού ενδιαφέροντος, λόγω της συνεχούς αναδιάταξης των δικτύων (εισχώρηση διεσπαρμένης παραγωγής), αύξησης των μη γραμμικών φορτίων και γενικότερα της ζήτησης ισχύος. Συνεπώς, υπάρχει μεγάλη ανάγκη για την καλύτερη, πιο αξιόπιστη και αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της ηλεκτρικής ισχύος, η οποία συνίσταται στο βέλτιστο έλεγχο των βασικών μεγεθών που αντιπροσωπεύουν τις γραμμές μεταφοράς, δηλαδή των μέτρων των τάσεων αναχώρησης και άφιξης, της μεταξύ τους γωνίας καθώς και της ισοδύναμης αντίδρασης που παρουσιάζουν. Σήμερα, η αποτελεσματικότερη λύση για τον αποδοτικότερο έλεγχο και την αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος, είναι η χρήση Ευέλικτων Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Flexible AC Transmission Systems – FACTS). Σε αυτή την οικογένεια συστημάτων ανήκει και ο Σύγχρονος Αντισταθμιστής Αέργου Ισχύος (STATic synchronous COMpensator − STATCOM).

Η παρούσα δημοσίευση αφορά το σχεδιασμό και την υλοποίηση διάταξης STATCOM για τη ρύθμιση της τάσης στο ζυγό σύνδεσής του. Η διάταξη αυτή συνδέεται σε τριφασικό δίκτυο χαμηλής τάσης (400V/50Hz) και έχει την ικανότητα έγχυσης αέργου ισχύος έως 10kVA με ελεγχόμενο τρόπο, ώστε να διατηρεί την τάση στο σημείο σύνδεσής της σταθερή. Για τον έλεγχο της διάταξης STATCOM χρησιμοποιήθηκε μικροελεγκτής 32-bit, αρχιτεκτονικής ARM, με ενσωματωμένη μονάδα κινητής υποδιαστολής (Floating Point Unit, FPU). Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα βασικά σχεδιαστικά και κατασκευαστικά τμήματα, από τα οποία αποτελείται η πειραματική διάταξη, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια λειτουργίας (ωμική, επαγωγική, χωρητική λειτουργία). Επιπλέον γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών σε σχέση με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το αντίστοιχο μοντέλο προσομοίωσης σε περιβάλλον Matlab/Simulink. Τονίζεται ότι στόχος της πειραματικής διάταξης είναι η ανάδειξη της λειτουργίας ενός συστήματος STATCOM μικρής ισχύος για την ελεγχόμενη έγχυση άεργου ισχύος στο ζυγό στον οποίο συνδέεται, χωρίς να δίνεται έμφαση σε βέλτιστα κριτήρια κατά το σχεδιασμό του.

Λέξεις-Κλειδιά: FACTS, STATCOM, αντιστάθμιση, αντιστροφέας, ελεγκτής τάσεως/ρεύματος.

Abstract

In recent years, there is an important issue of research interest in the quality and demand for power in Electrical Power Systems, due to the continuous redesign of the networks (penetration of dispersed energy production), the increase in non-linear loads, and power demand in general. Therefore, reliable and more efficient use of electrical power is

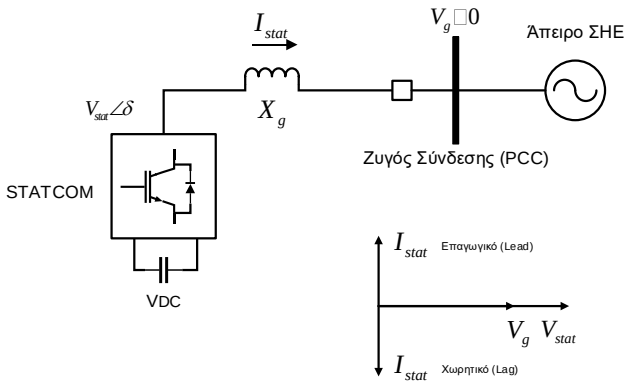
necessary. Optimal use of the power of an electrical system consists of the optimal control of the basic components representing the transmission lines, i.e. the magnitudes of the sending and receiving end voltages, the angle between them and the equivalent impedance. The most effective solution for the most efficient control and increased energy transfer capacity is the use of Flexible AC Transmission Systems (FACTS). This family of systems also includes the Static Synchronous Compensator (STATCOM).

This paper is about designing and hardware implementation of STATCOM (Static Synchronous Compensator) to control the voltage at the Point of Common Coupling (PCC). This device is connected to the three phase low voltage (400V/50Hz) grid and has the capability to control the injection or absorption of the reactive power up to 10 kVA to keep the voltage at PCC steady. The STATCOM control logic was developed on 32-bit ARM architecture microcontroller with integrated Floating Point Unit (FPU). The following sections present the basic design and construction parts of which the experimental assembly is composed, as well as the experimental results for the various operation modes. In addition, the experimental results are compared with the corresponding results of a simulation model in Matlab/Simulink. It is emphasized that the objective of the experimental assembly is to highlight the operation of a low power STATCOM system for the controlled injection/absorption of reactive power at PCC, without emphasizing on optimal criteria.

keywords: FACTS, STATCOM, compensation, inverter, voltage/current controller.

1. Εισαγωγή

Το STATCOM είναι μία σύγχρονη γεννήτρια τάσης (Synchronous Voltage Generator, SVG), βασισμένη σε τοπολογίες ηλεκτρονικών ισχύος, η οποία έχει τη δυνατότητα να παρέχει ή να απορροφά ταχύτατα άεργο ισχύ προς το ή από το δίκτυο. Οι κύριες διατάξεις που το απαρτίζουν είναι: DC πυκνωτής, μετατροπέας ισχύος DC/AC και πηνία ζεύξης. Σκοπός του STATCOM είναι να μεταβάλλει την τάση εξόδου του, ώστε να επιτυγχάνει μια επιθυμητή έγχυση άεργου ισχύος στο δίκτυο. Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα του STATCOM διασυνδεδεμένου στο δίκτυο.



Σχήμα 1: Βασική διάταξη STATCOM διασυνδεδεμένο στο δίκτυο.

όπου V_{stat} είναι το μέτρο της φασικής τάσης εξόδου του STATCOM, V_g είναι το μέτρο της φασικής τάσης του δικτύου, δ είναι η μεταξύ των δύο τάσεων γωνία, X_g είναι η αντίδραση του πηνίου διασύνδεσης και I_{stat} είναι το εγχεόμενο ρεύμα του STATCOM.

Το STATCOM απορροφά ή παράγει άεργο ισχύ σύμφωνα με την παρακάτω σχέση

$$Q_{stat} = \frac{V_g \left(V_{stat,1} \cdot \cos\delta - V_g \right)}{X_{g,1}} (\text{pu}) \qquad (1)$$

ενώ οι απώλειες του STATCOM (η κατανάλωση ενεργού ισχύος που απαιτείται για την φόρτιση του DC πυκνωτή) δίνονται από τη σχέση

$$P_{loss} = \frac{V_{stat,1} V_g \sin\delta}{X_{g,1}} (\text{pu}) \quad (2)$$

όπου, Q_{stat} είναι η άεργος ισχύς σε α.μ., P_{loss} είναι οι απώλειες ισχύος σε α.μ., $X_{g,1}$ είναι η αντίδραση του πηνίου διασύνδεσης στη θεμελιώδη συχνότητα και $V_{stat,1}$ είναι η θεμελιώδης συνιστώσα της φασικής τάσης εξόδου του STATCOM.

Η ρύθμιση της αέργου ισχύος επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο έλεγχο του μέτρου της φασικής τάσης εξόδου V_{stat} του STATCOM, καθορίζοντας τρεις λειτουργικές καταστάσεις:

- Εάν η V_{stat} είναι ίση με την V_g , τότε το STATCOM δεν ανταλλάσσει άεργο ισχύ με το δίκτυο (λειτουργία χωρίς φορτίο).
- Εάν η V_{stat} είναι μεγαλύτερη της V_g τότε το STATCOM παράγει χωρητική άεργο ισχύ προς το δίκτυο (χωρητική λειτουργία).
- Τέλος, εάν η V_{stat} είναι μικρότερη της V_g τότε το STATCOM απορροφά επαγωγική άεργο ισχύ από το δίκτυο (επαγωγική λειτουργία).

2. Σχεδίαση του STATCOM

Στο σχήμα 2α παρουσιάζεται η γενική διάταξη του STATCOM διασυνδεδεμένου στο δίκτυο, καθώς και το δομικό διάγραμμα ελέγχου του. Το τμήμα ισχύος της διάταξης αυτής απαρτίζεται από τον DC πυκνωτή, τον μετατροπέα DC/AC, το φίλτρο εξόδου LCL και το δίκτυο (το σημείο σύνδεσης του STATCOM). Η διάταξη ελέγχου (σχ. 2β) απαρτίζεται από τον ελεγκτή ισχύος PQ, τη διάταξη διαμόρφωσης παλμών SPWM του μετατροπέα DC/AC, και τη διάταξη συγχρονισμού με το δίκτυο PLL. Στόχος της διάταξης ελέγχου είναι η επίτευξη ελεγχόμενης έγχυσης άεργου ισχύος στην έξοδο του STATCOM σύμφωνα με μία επιθυμητή τιμή (Q^*) και η διατήρηση της συνεχούς τάσης στα άκρα του DC πυκνωτή εντός συγκεκριμένων επιθυμητών ορίων (v_{dc}^*). Οι αλγόριθμοι σχεδίασης και υλοποίησης της διάταξης PLL ποικίλουν, ωστόσο για τον σχεδιασμό μας στηριχθήκαμε στη διάταξη κλειδώματος φάσης με διπλή απόζευξη στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς (Double Decoupled Synchronous Reference Frame PLL – DDSRF-PLL). Η διάταξη DDSRF-PLL (σχ. 3) αποτελεί την πιο εξελιγμένη υλοποίηση σε σχέση με την απλή (SRF-PLL), καθώς δουλεύει με καλύτερη ακρίβεια σε μη ιδανικές καταστάσεις δικτύου. Στη γενική περίπτωση όπου το δίκτυο δεν είναι πλήρως συμμετρικό, οι έξοδοι των δικτύων απόζευξης παρουσιάζουν ένα σήμα σταθερής τιμής και ένα που ταλαντώνεται με διπλάσια συχνότητα 2ω, όπως φαίνεται στις σχέσεις (3) και (4).

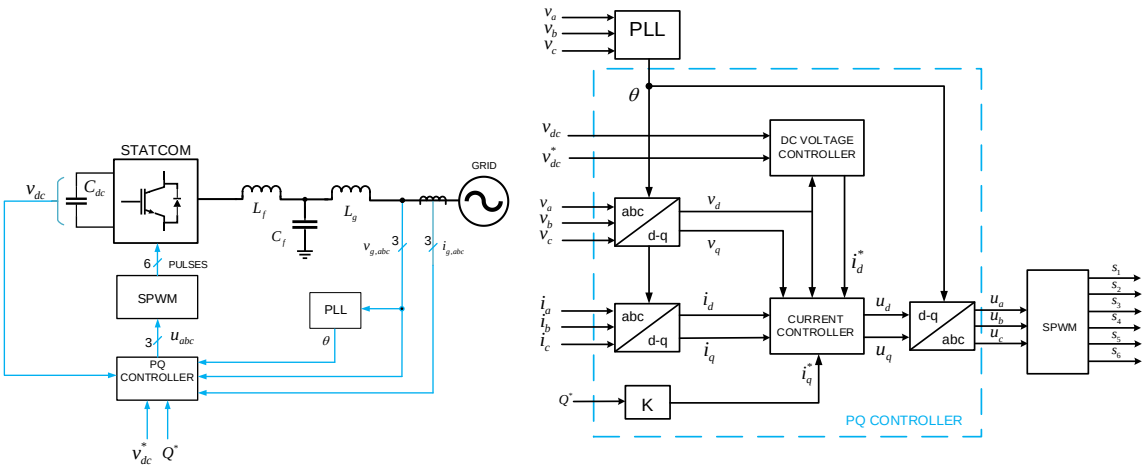
$$\begin{aligned} v_{d^+}^* &= v_{d^+} - \bar{v}_{d^-} \cos(2\omega t) - \bar{v}_{q^-} \sin(2\omega t) \\ v_{q^+}^* &= v_{q^+} + \bar{v}_{d^-} \sin(2\omega t) - \bar{v}_{q^-} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_{d^-}^* &= v_{d^-} - \bar{v}_{d^+} \cos(2\omega t) - \bar{v}_{q^+} \sin(2\omega t) \\ v_{q^-}^* &= v_{q^-} - \bar{v}_{d^+} \sin(2\omega t) - \bar{v}_{q^+} \cos(2\omega t) \end{aligned} \quad (4)$$

Η εξάλειψη των ανεπιθύμητων ταλαντώσεων διπλάσιας συχνότητας επιτυγχάνεται με χρήση βαθυπερατών φίλτρων στην έξοδο των δικτύων απόζευξης, η συνάρτηση μεταφοράς των οποίων δίνεται από τη σχέση (5).

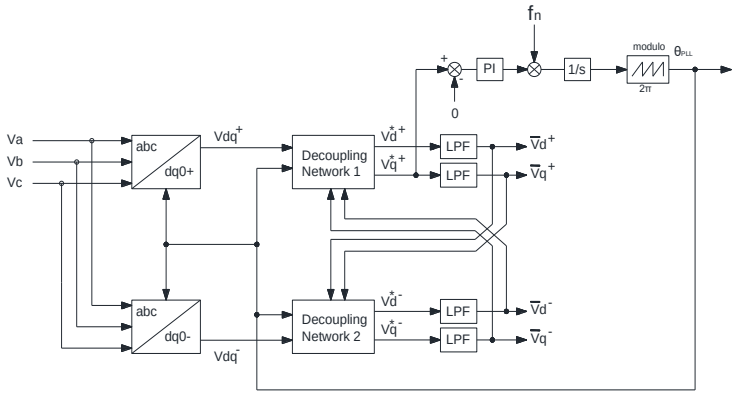
$$H_{LPF}(s) = \frac{\bar{v}}{v} = \frac{\omega_f}{s + \omega_f} \quad (5)$$

όπου, ω_f είναι η γωνιακή συχνότητα αποκοπής του βαθυπερατού φίλτρου.



(α) (β)

Σχήμα 2: (α) Γενική διάταξη ελέγχου του STATCOM (β) Δομικό διάγραμμα ελεγκτή ισχύος PQ.



Σχήμα 3: Δομικό διάγραμμα διάταξης DDSRF-PLL.

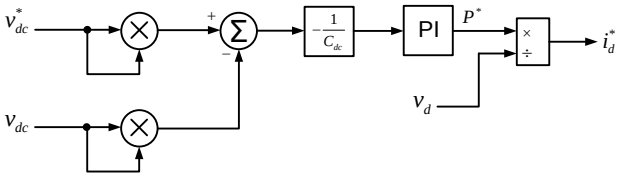
Ελεγκτής συνεχούς τάσης (DC Voltage Controller)

Με βάση τη θεωρία PQ, η ανά μονάδα ενεργός ισχύς που απορροφά ο πυκνωτής από το δίκτυο, εξαρτάται από το ρεύμα εξόδου του STATCOM στον ευθύ άξονα i_d όταν το δίκτυο είναι συγχρονισμένο ($v_q = 0$). Ο σχεδιασμός του ελεγκτή συνεχούς τάσης (σχ. 4) στηρίζεται στις παρακάτω σχέσεις.

$$P_{dc} = P_{loss} = v_{dc}^{*} \cdot i_{dc} = v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q (pu) \tag{6}$$

$$i_d^{*} = \frac{P_{loss}}{v_d} = -\frac{\left(v_{dc}^{*}\right)^2}{s \cdot C_{DC} \cdot v_d} \tag{7}$$

όπου, v_d, v_q είναι η τάση του δικτύου στον ευθύ και κάθετα άξονα αντίστοιχα και i_d, i_q είναι το ρεύμα εξόδου του STATCOM στον ευθύ και κάθετα άξονα αντίστοιχα.



Σχήμα 4: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή συνεχούς τάσης.

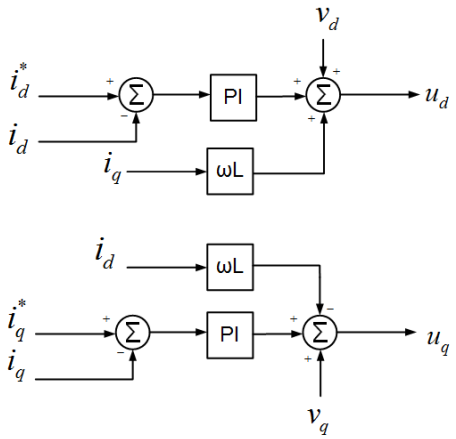
Ελεγκτής ρευμάτων (Current Controller)

Σύμφωνα με τη θεωρία PQ, η ανά μονάδα άεργος ισχύς που εγχέεται από το STATCOM στο δίκτυο (σχέση 8), εξαρτάται από το ρεύμα εξόδου του STATCOM στον κάθετο άξονα (σχέση 9). Ο σχεδιασμός του ελεγκτή ρεύματος (σχ. 5) στηρίζεται στις παρακάτω σχέσεις.

$$Q^* = v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q \,(pu) \tag{8}$$

$$i_q^* = -\frac{Q^*}{v_d} \tag{9}$$

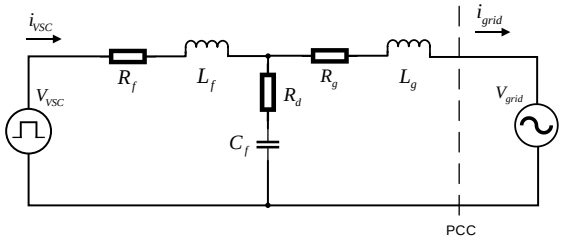
$$\begin{aligned} u_d^* &= \omega L_g i_q + v_d \\ u_q^* &= -\omega L_g i_d + v_q \end{aligned} \tag{10}$$



Σχήμα 5: Μπλοκ διάγραμμα ελεγκτή ρευμάτων.

Σχεδιασμός του φίλτρου εξόδου LCL

Οι περισσότερες εφαρμογές STATCOM, αλλά και γενικότερα διασυνδεδεμένων αντιστροφέων, χρησιμοποιούν LCL φίλτρο στην έξοδό τους, καθώς η ικανότητα του LCL ως προς την εξάλειψη αρμονικών είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τη χρήση ενός απλού L φίλτρου. Το βασικό του πλεονέκτημα προέρχεται από το ικανοποιητικό κέρδος που παρουσιάζει το φίλτρο LCL στις χαμηλές συχνότητες και την αρμονική εξασθένιση στις υψηλές συχνότητες. Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται το ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα του LCL. Η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου δίνεται από τη σχέση 11.



Σχήμα 6: Ισοδύναμο ανά φάση κύκλωμα LCL.

$$H_{LCL}(s) = \frac{I_{grid}(s)}{V_{VSC}(s)} = \frac{sR_dC_f + 1}{s^3 L_g L_f C_f + s^2 C_f \left(L_g \left(R_f + R_d\right) + L_f \left(R_d + R_g\right)\right) + s\left(L_g + L_f + C_f \left(R_d R_g + R_d R_f + R_f R_g\right)\right) + R_g + R_f} \tag{11}$$

όπου, V_{vsc} είναι η τάση εξόδου του μετατροπέα DC/AC, V_{grid} είναι η τάση του δικτύου, L_f είναι η αυτεπαγωγή του φίλτρου, L_g είναι η αυτεπαγωγή του δικτύου, C_f είναι η

χωρητικότητα του πυκνωτή του φίλτρου, R_d είναι η αντίσταση απόσβεσης του φίλτρου και R_f, R_g είναι οι εσωτερικές αντιστάσεις των πηνίων φίλτρου και δικτύου.

Η συχνότητα συντονισμού του φίλτρου είναι:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_g + L_f}{L_g L_f C_f}} \tag{12}$$

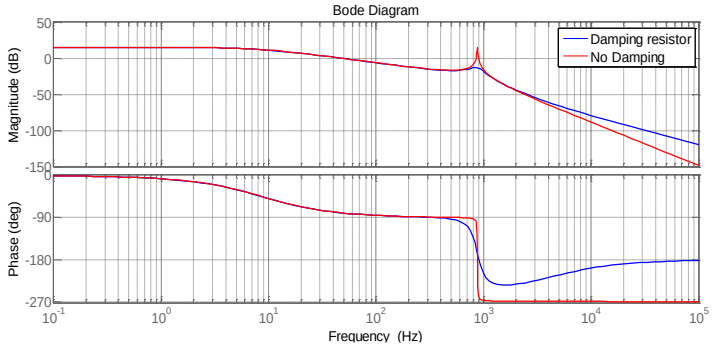
Εμπειρικά, για την αποφυγή προβλημάτων συντονισμού, η συχνότητα f_{res} πρέπει να είναι μεγαλύτερη κατά 10 φορές από τη συχνότητα f_g του δικτύου και μικρότερη κατά 2 φορές από τη διακοπτική συχνότητα f_{sw} (σχέση 13).

$$10 f_g \le f_{res} \le 0.5 f_{sw} \tag{13}$$

Η απόσβεση της κορυφής συντονισμού του φίλτρου γίνεται με χρήση ωμικής αντίστασης R_d (παθητική απόσβεση) σε σειρά με τον πυκνωτή (σχ. 6), η τιμή της οποίας δίνεται από τη σχέση (22).

$$R_d = \frac{1}{3 \cdot \omega_{res} \cdot C_f} \tag{22}$$

Στο σχήμα 7 παρουσιάζεται το διάγραμμα Bode του φίλτρου με και χωρίς τη χρήση της αντίστασης απόσβεσης R_d.



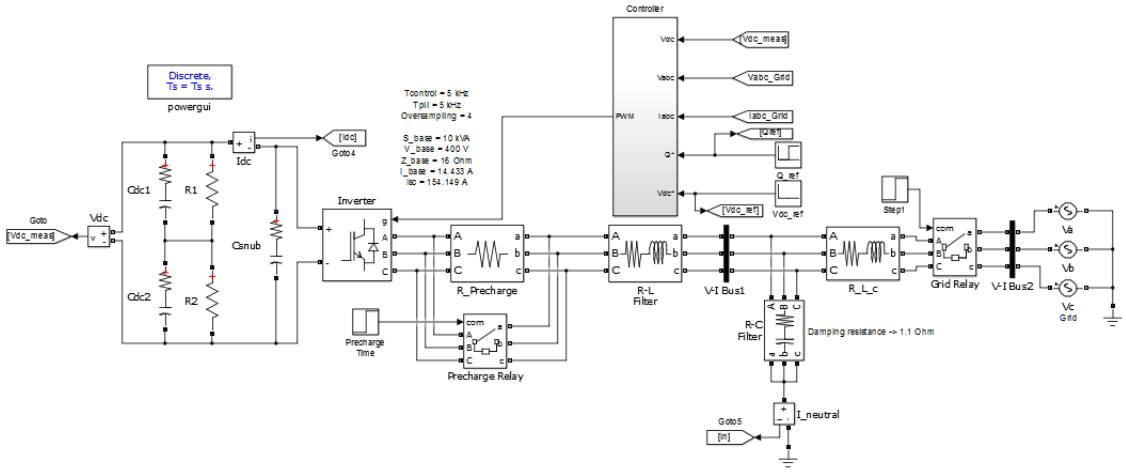
Σχήμα 7:Απόκριση συχνότητας φίλτρου LCL με και χωρίς τη χρήση αντίστασης απόσβεσης.

3. Προσομοίωση

Στον πίνακα Ι παρουσιάζονται οι προδιαγραφές του συστήματος, σύμφωνα με τις οποίες υλοποιήθηκε και προσομοιώθηκε η διάταξη. Η διάταξη προσομοίωσης του STATCOM (σχ. 8) αποτελείται από τριφασικό αντιστροφέα 2 επιπέδων με χρήση IGBT's, τριφασικό δίκτυο τάσης 400V/50Hz, φίλτρο εξόδου LCL με αντίσταση απόσβεσης, διάταξη προφόρτισης δικτύου συνεχούς τάσης (DC link), και ελεγκτή, ο οποίος σύμφωνα με τις επιθυμητές τιμές (Vdc_ref, Qref) παράγει τους απαραίτητους παλμούς στα IGBT's του αντιστροφέα. Το μοντέλο προσομοιώθηκε σε διακριτό χρόνο (discrete mode) σταθερού βήματος (fixed-step) και χρόνο δειγματοληψίας 500ns. Στις κυματομορφές που ακολουθούν παρουσιάζονται οι χρονικές αποκρίσεις του STATCOM σε τρείς διαφορετικές μεταβολές της άεργου ισχύς αναφοράς, έχοντας σταθερή την αναφορά της συνεχούς τάσης (Vdc_ref = 700V). Αναλυτικότερα για 0.4s<t<0.5s, Qref=0 (λειτουργία χωρίς φορτίο), για 0.5s<t<0.6s, Qref = +5kVAr (χωρητική λειτουργία) και για 0.6s<t<0.7s, Qref = –5kVAr (επαγωγική λειτουργία).

Πίνακας 1: Παράμετροι Συστήματος

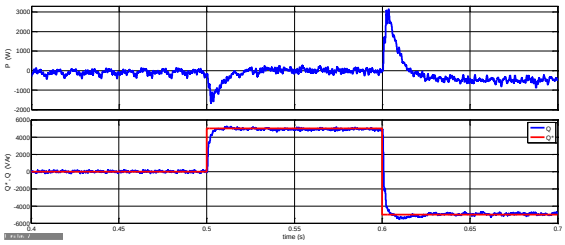
Παράμετρος	**Μονάδα**	**Τιμή**		
Πολική τάσης δικτύου (βασική τάση) ,V_g	V	400		
Ισχύς STATCOM (βασική ισχύς) , $S_{STATCOM}$	VAr	10000		
Συχνότητα δικτύου , f_g	Hz	50		
Διακοπτική συχνότητα , f_{sw}	kHz	10		
Συχνότητα δειγματοληψίας ελέγχου , f_s	kHz	5		
Τάση πυκνωτών DC ,V_{DC}	V	700		
Χωρητικότητα DC link, C_{DC}	μF	2138		
Αυτεπαγωγή φίλτρου ,L_f/R_f	mH,Ω	1,655 , 0,09		
Πυκνωτής φίλτρου , C_f	μF	40		
Αντίσταση απόσβεσης φίλτρου, R_d	Ω	1,1		
Αυτεπαγωγή δικτύου, L_g/R_g	mH,Ω	1,655 , 0,09		
Παράμετροι ελεγκτή DC τάσης K_{p_dc}, K_{i_dc}, K_{awd_dc}	-	5	100	30
Παράμετροι ελεγκτή ρευμάτων K_{p_i}, K_{i_i}, K_{awd_i}	-	0,15	30	1



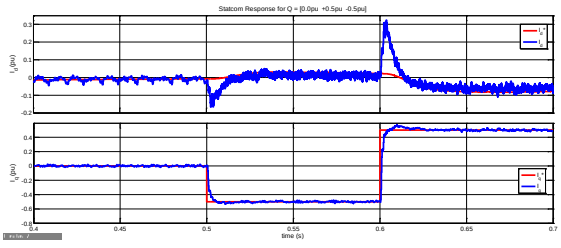
Σχήμα 8: Γενική διάταξη προσομοίωσης STATCOM σε περιβάλλον Matlab/Simulink.

3.1 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

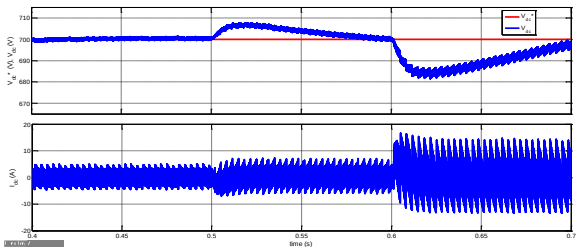
Κατά τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας το STATCOM καταναλώνει περίπου 200W (σχ. 9) για να κρατάει το επίπεδο τάσης του πυκνωτή στα 700V. Κατά τη βηματική μεταβολή της ζήτησης αέργου ισχύος, παρατηρείται τις χρονικές στιγμές 0,5s και 0,6s απότομη μεταβολή της DC τάσης, η αποκατάσταση της οποίας επέρχεται μετά από περίπου 100ms (σχ. 11). Είναι αξιοσημείωτο ότι, αυτή η διαταραχή της DC τάσης δεν επηρεάζει την παρεχόμενη άεργο ισχύ από το STATCOM (σχ. 9, 10) η οποία ακολουθεί την επιθυμητή τιμή χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα. Η συμπεριφορά αυτή έρχεται να επαληθεύσει τη θεωρία PQ, σύμφωνα με την οποία υπάρχει απόζευξη των σχέσεων ενεργού και αέργου ισχύος ως προς τα ρεύματα στον άξονα dq, δηλαδή η μεταφορά πραγματικής ισχύος εξαρτάται από το ρεύμα στον ευθύ άξονα I_d ενώ η μεταφορά αέργου ισχύος από το ρεύμα στον κάθετο άξονα I_q (σχ. 10).



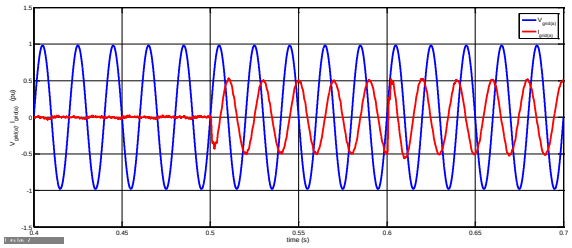
Σχήμα 9: Απόκριση ενεργού και αέργου ισχύος του STATCOM.



Σχήμα 10: Απόκριση ρευμάτων εξόδου του STATCOM στο σύγχρονα στρεφόμενο πλαίσιο αναφοράς dq.



Σχήμα 11: Απόκριση συνεχούς τάσης και ρεύματος του STATCOM.



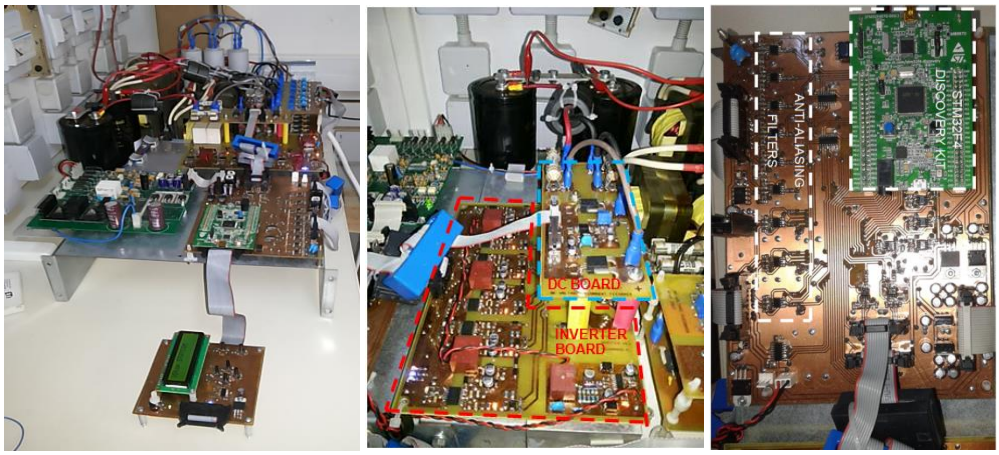
Σχήμα 12: Απόκριση φασικής τάσης δικτύου και ρεύματος εξόδου του STATCOM.

4. Πειραματική Υλοποίηση

Η πειραματική διάταξη του STATCOM (σχ. 13α) αποτελείται από τις παρακάτω βαθμίδες/κυκλώματα τυπωμένων πλακετών (Printed Circuits Boards, PCBs).

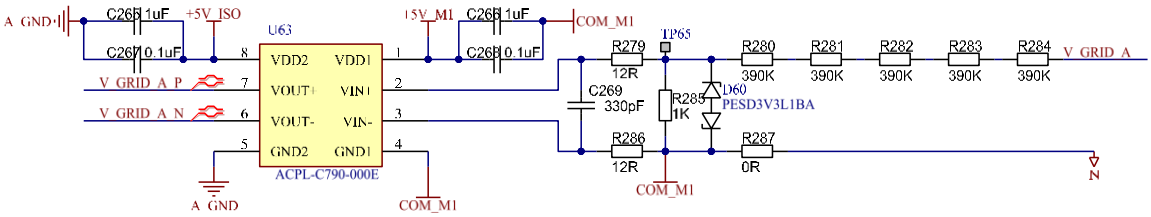
- Πλακέτα ελέγχου (σχ. 14)
- Πλακέτες μέτρησης εναλλασσόμενης και συνεχούς τάσης
- Πλακέτα εξόδου
- Πλακέτα αντιστροφέα (σχ. 13β)
- Πλακέτα χρήστη
- Πλακέτα βοηθητικής τροφοδοσίας
- Πλακέτα φίλτρου ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής
- Βαθμίδα LCL φίλτρου

Ο αντιστροφέας του STATCOM αποτελείται από IGBT 6-pack module της εταιρείας FUJI (έξι IGBT με αντιπαράλληλες διόδους ελευθέρας ροής εντός πλαστικού καλύμματος). Τα κυκλώματα οδήγησης των IGBT χρησιμοποιούν το ολοκληρωμένο κύκλωμα, με γαλβανική απομόνωση και θωράκιση, SI8286-CD της εταιρείας Silicon Labs. Για τη μέτρηση της DC τάσης χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο τάσης ACPL-C870, ενώ για τη μέτρηση των εναλλασσόμενων τάσεων το αισθητήριο ACPL-C790 της εταιρείας Avago. Για τη μέτρηση των ρευμάτων χρησιμοποιήθηκε το αισθητήριο ρεύματος ACS758LCB-050 της εταιρείας Allegro. Ο έλεγχος της διάταξης πραγματοποιείται μέσω του μικροελεγτκή STM32F407 (Discovery kit), 32-bit, αρχιτεκτονικής ARM, με FPU, της εταιρείας ST. Στα σχήματα 14–17 φαίνονται οι διατάξεις μέτρησης τάσεων και ρευμάτων του STATCOM. Μεταξύ μέτρησης (σημάτων ανάδρασης) και μικροελεγκτή μεσολαβούν φίλτρα anti-aliasing για την απόρριψη ανώτερων αρμονικών συνιστωσών και θορύβου.

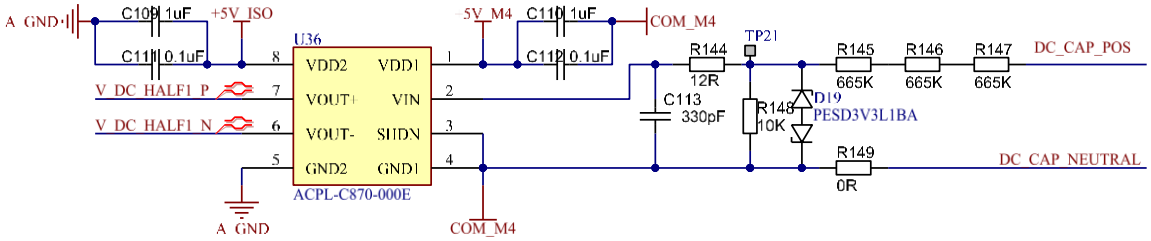


(α) (β) (γ)

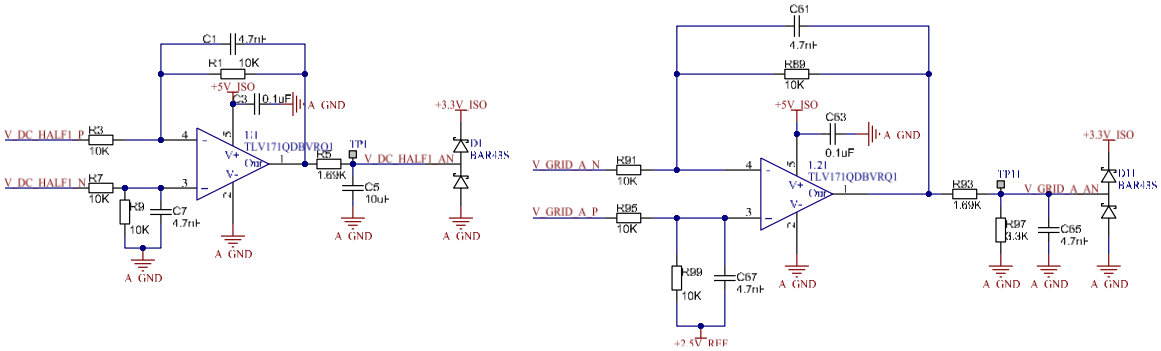
Σχήμα 13: (α) Γενική άποψη πειραματικής διάταξης STATCOM
(β) Τριφασικός αντιστροφέας, (γ) πλακέτα ελέγχου.



Σχήμα 14: Διάταξη μέτρησης εναλλασσόμενης τάσης.

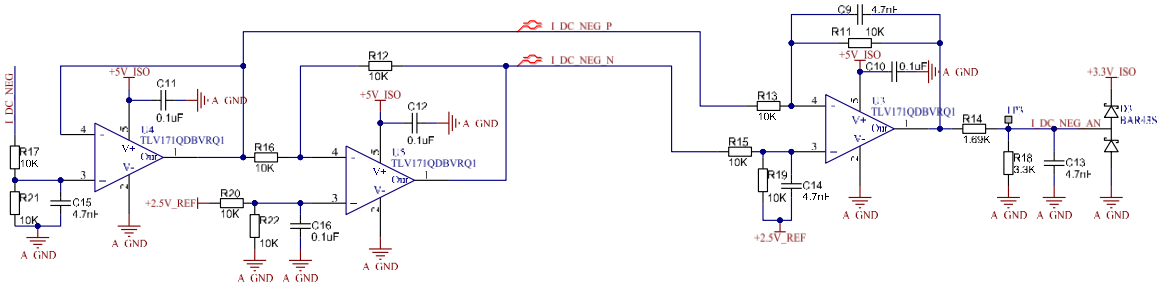


Σχήμα 15: Διάταξη μέτρησης συνεχούς τάσης.



(α) (β)

Σχήμα 16: Anti-aliasing φίλτρο (α) συνεχούς τάσης (β) εναλλασσόμενης τάσης.



Σχήμα 17: Anti-aliasing φίλτρο ρεύματος.

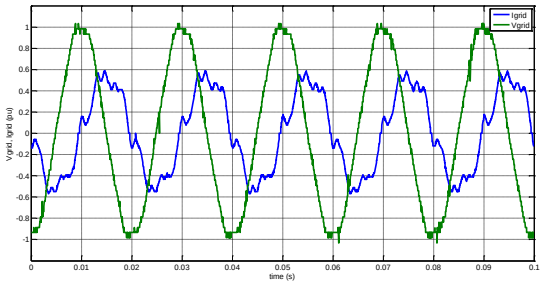
5. Πειραματικά Αποτελέσματα

Οι κυματομορφές για τις διάφορες λειτουργίες του STATCOM (σχήματα 18–20), ελήφθησαν μέσω ψηφιακού παλμογράφου Tektronix TDS2004C/70MHz.

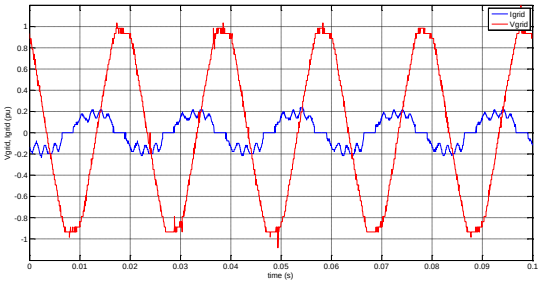
6. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μία μέθοδο σχεδιασμού και υλοποίησης ενός STATCOM ισχύος 10kVA, για τη σύνδεσή του στο δίκτυο χαμηλής τάσης, με σκοπό την ελεγχόμενη ρύθμιση της άεργου ισχύος και συνεπώς της τάσης στο σημείο σύνδεσής του. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, η προτεινόμενη κατασκευή ανταποκρίνεται στο μεγαλύτερο βαθμό στις αρχικές προσδοκίες αλλά και στις απαιτήσεις για τις οποίες είχε σχεδιαστεί. Το βασικότερο μειονέκτημα που παρουσιάζει είναι το μη αναμενόμενο

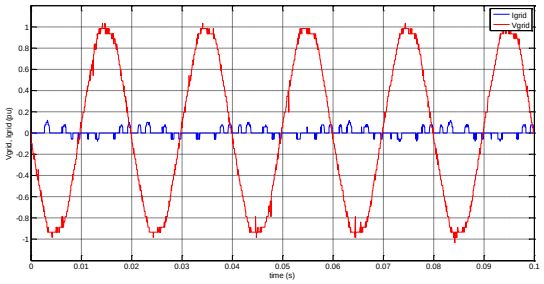
αρμονικό περιεχόμενο χαμηλής τάξης στο ρεύμα εξόδου. Στηριζόμενοι στις εργαστηριακές μετρήσεις, διακρίναμε ότι το πρόβλημα αυτό πηγάζει από τον παράλληλο συντονισμό της χωρητικότητας του φίλτρου LCL με τις παράλληλες αυτεπαγωγές του δικτύου.



Σχήμα 18: Κυματομορφές φασικής τάσεως δικτύου και ρεύματος εξόδου STATCOM για χωρητική λειτουργία (Q_{ref} = +5 kVAr).



Σχήμα 19: Κυματομορφές φασικής τάσεως δικτύου και ρεύματος εξόδου STATCOM για επαγωγική λειτουργία (Q_{ref} = –2 kVAr).



Σχήμα 20: Κυματομορφές φασικής τάσεως δικτύου και ρεύματος εξόδου STATCOM για λειτουργία χωρίς φορτίο (Q_{ref} = 0 kVAr).

7. Βιβλιογραφία

Texas Instruments Incorporated, "*Software phase locked loop design using C2000 microcontrollers for three phase connected applications*", Application Report SPRABT4A, November 2013.

H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, "*Instantaneous power theory and applications to power conditioning*", IEEE Press, Wiley, 2007, New Jersey.

M. B. Said-Romdhane, M. W. Naouar, I. S. Belkhodja, E. Monmasson, "*An Improved LCL Filter Design in Order to Ensure Stability without Damping and Despite Large Grid Impedance Variations*", Article 10-000336 vol.2, Energies, March 2017.

519-1992-IEEE, "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*", The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.: New York, 1993, NY, USA.

Square D by Schneider Electric, "*Product Data Bulletin: The origin, effect, and suppression of harmonics in industrial electrical networks*", Bulletin No 0140PD9502, March 1997, Lavargne, TN, USA.

R. Mihalic, P. Zunko and D. Povh, "*Improvement of Transient Stability using Unified Power Flow Controller*", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp. 485-491, 1996.

N. G. Hingorani, L. Gyugyi, "*Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*", IEEE Press, 1999, New York.

N. Mithulanathan, C. A. Canizares, J. Reeve, Graham J. Rogers, "*Comparison of PSS, SVC and STATCOM Controllers for Damping Power System Oscillations*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 786-792, May 2003.

E. Z. Zhou, "*Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 655-661, May 1993.